

# 航空機用チタンの適用状況と今後の課題

## Application and Features of Titanium for Aerospace Industry

稲垣 育宏\*  
Ikuhiro INAGAKI

武智 勉  
Tsutomu TAKECHI

白井 善久  
Yoshihisa SHIRAI

有安 望  
Nozomu ARIYASU

### 抄 録

航空機用チタンは、機体用には純チタン、エンジン用には Ti-6Al-4V 合金を主体としたチタン合金が使用されており、航空機の低燃費化に伴い需要が拡大している。一方、航空機分野への参入に際しては、各種認証の取得および高度な品質管理が要求される。航空機におけるチタンの適用状況および事例、航空機用チタン材料例を紹介するとともに、航空機用チタン適用拡大のための課題と新日鐵住金(株)の取り組みを述べた。

### Abstract

In the field of aerospace, titanium has been applied for many years. Commercially pure titanium and titanium alloy as represented by Ti-6Al-4V are mainly used for the airframe and the engine parts respectively. The demand expansion of titanium has been expected due to realize low fuel consumption of aircraft. On the other hand, various qualifications and high quality management are required in order to entry in the aerospace industry. This paper describes the application situation of present state, titanium materials for the aerospace applications and our efforts in regard to the issues for expanding the use of titanium in this field.

## 1. はじめに

工業用純チタン・チタン合金（以下チタンと称する）は、軽量（密度は銅の約 60%）、高強度および耐食性に優れた材料として、航空機用途に幅広く使われている。最近では、航空機の低燃費化のため、機体やエンジン部品への炭素繊維強化複合材（CFRP：Carbon Fiber Reinforced Plastic Composite）の適用比率が高まっているが、チタンは、耐食性や熱膨張率において CFRP との適合性に優れていることから、ますます需要が増大している。CFRP を大量に使用するエアバス社製の低燃費型 A350XWB 機におけるチタンの使用量は、従来機に比べて 2 倍以上となっている。また、2012 年 10 月に開催された、第 28 回 ITA 総会（ITA：International Titanium Association）においても、図 1 および図 2 に示すように、今後の航空機需要が堅調であり、チタンの需要も増大していく見通しが報告されている<sup>2)</sup>。

新日鐵住金(株)は、1985 年ロールスロイス社および国内重工メーカーからの認証を取得し、航空機エンジン用チタン合金の量産を開始した。また、2002 年エアバス社と長期契約を締結し、同社へは高いシェアで航空機機体用純チタ

ンを納入してきている。航空機分野への参入および適用拡大に際しては、品質管理が極めて重要であり、各種認証取得およびきめ細かい操業管理などが必要である。

本報では、航空機用チタンの適用につき、現況を紹介するとともに、適用拡大に対する課題への取り組み状況について述べる。

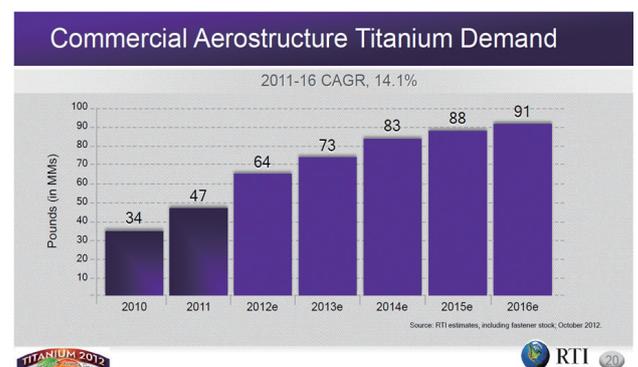


図 1 (米) RTI 社による航空機機体用チタン・チタン合金の需要実績および予想

Commercial aerostructure titanium demand published by RTI in 2012 ITA

\* 交通産機品事業部 製鋼所 産機品製造部長 大阪府大阪市此花区島屋 5-1-109 ☎ 554-8555

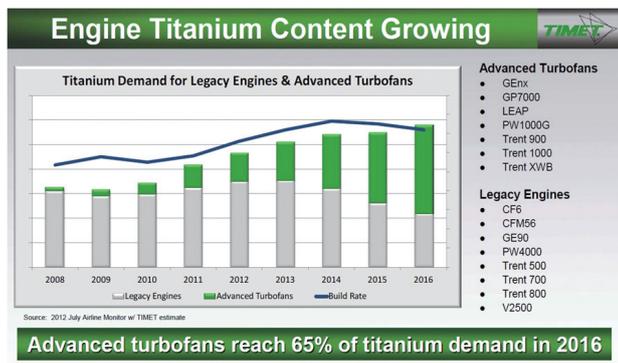


図2 (米) TIMET 社による航空機エンジン用チタン・チタン合金の需要実績および予想

Engine titanium content growing published by TIMET in 2012 ITA

## 2. 航空機におけるチタンの適用状況

### 2.1 機体用チタン

航空機の機体材料は、布、木材から始まりアルミニウム合金そして現在ではCFRPへと進化してきた。また、高強度が要求される部位（骨材、ジョイント部）については鋼系素材が使用されていたが、軽量化のため、チタン合金に置き換わってきた。異種材料で構成される機体接合部の設計は、電位差腐食（ガルバニック腐食）の防止や熱膨張係数の違いによる歪解消を考慮しなければならない。近年ではCFRP多用により、CFRPと物理的性質が近いチタン合金がますます採用されるようになってきた。

### 2.2 エンジン用チタン

民間航空機用のエンジンは、燃焼効率を向上させて低燃費とすることを目的に、ターボファンエンジンが多く採用されている。エンジン後方で燃料を燃焼させてガスタービンとともに、前部のファンブレードを回転させ、そのブレードが前方から取り入れた空気を後方に押しやるとともに、燃焼ガスを後方に排出させることによる反作用を推進力としている。

このようなターボファンエンジンは4つの部位から構成され、前部から順に、ファン、コンプレッサー（圧縮機）、燃焼器とタービンの各部位に分けられる。これらに使われている材料は、前半部の比較的溫度が低い（600℃以下）ファンとコンプレッサーには、主にチタン合金が使われている。後半部の溫度が高くなる燃焼器やタービンには、ニッケル基合金や鉄基合金が用いられている。

### 2.3 航空機用チタン材料に求められる特性

航空機の機体には、メンテナンスコストを下げるために、疲労強度、き裂伝播特性、破壊靱性および耐食性に優れた材料が有効である。また、上述の通りCFRPとの相性もあり、チタン合金が多く用いられる。機体用チタン合金の使用箇

表1 航空機機体用チタン合金と適用例  
Examples of application of titanium alloys for airframe

Material	Example of application
Ti-6Al-4V	Cockpit window frame, Wing box, Fastener
Ti-3Al-2.5V	Hydraulic pipe
Ti-10V-2Fe-3Al	Landing gear, Track beam
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	Exhaust, Tail cone
Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	Duct

所と材質の例を表1に示す。一般に、材質名に付記されている数値は、主要元素の含有量を示しており、例えばTi-6Al-4V合金の場合、6wt%のアルミニウム(Al)と4wt%のバナジウム(V)を含んでいることを表している。

航空機エンジン用には、軽量で高強度、すなわち高比強度が求められるため、純チタンよりも強度に優れるチタン合金が用いられる。また、耐熱性も重要である。比強度の高いアルミニウム合金は、200℃程度以上の温度では強度が急激に低下するため、航空機エンジンにはあまり使われていない。チタン合金も、温度が上がるほど比強度は低下するが、500～600℃まではニッケル基合金よりも比強度は優れている。

ファンブレードは、高温にならないために、比強度が大きく疲労強度に優れたTi-6Al-4V合金が主に使用されている。中小型機用のエンジンでは、鍛造した中実品が使用されているが、大型エンジンではファンブレードも大きくなるため、中空化等による軽量化の工夫がなされている。ファンディスクは、ファンブレードを支えて回転させる部品であり、最重要保安部品とされている。このため、高強度で靱性の高い材料が求められており、Ti-6Al-4V合金やTi-17(Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo)合金等が使用されている。

コンプレッサーの低圧側から高圧側へと温度が高くなり、耐熱性を有する高強度の材料が求められる。コンプレッサーブレードは、低圧側ではTi-6Al-4V合金が使用されているが、高圧側になるとTi-8Al-1Mo-1V合金やTi-6Al-2Sn-4Zr-6Mo合金等、高温強度に優れ疲労特性靱性にも優れたチタン合金が用いられている。コンプレッサーディスクは、高温強度や靱性の他に、低サイクル疲労特性やクリープ特性も求められており、耐熱性に優れたTi-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si合金やTi-6Al-2Sn-4Zr-6Mo合金が用いられている。

### 2.4 航空機用チタン材料例

以下に、航空機の機体およびエンジンに用いられている主なチタンについて紹介する。

#### (1) 純チタン

純チタンには、強度に応じて4種類のグレードがあり、必要な強度や成形加工に応じた材料が用いられている。用途は、厨房、トイレ等の水回り、ダクトや配管等の非構造部材であり、耐食性や成形加工が求められる部品が多い。

## (2) Ti-6Al-4V 合金

Ti-6Al-4V 合金は、チタン合金を代表する合金であり、強度、延性、疲労強度、破壊靱性、高温強度、クリープの各種の特性や溶接性、加工性、熱処理性（熱処理により高強度化しやすい）等の特性がバランスよく備わった合金である。このため、機体やエンジンにも多くの部分で使用されている。また、信頼性を要求する航空機での使用実績が多く、各種データが豊富に蓄積されていることも、Ti-6Al-4V 合金が使用される大きな理由である。機体では、一般構造材、ボルト、シートレール等に使われている。エンジンでは、この合金の耐用温度が約 300℃と比較的低温であるため、ファンブレードやファンケース等、あまり高温にならないエンジンの入側で多く使用されている。主な関連規格は、JIS 60 種、ASTM G5 である。焼鈍材は、常温で耐力が 825MPa 以上、引張強度が 895MPa 以上、伸びが 10%以上である<sup>3)</sup>。

## (3) Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 合金

Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 合金は、1960 年後半に開発された耐熱合金で、耐熱温度は 450℃程度である。1970 年後半には、耐酸化性やクリープ特性を向上させるために、Si を 0.06 ~ 0.2wt% 添加した Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si 合金が開発され、耐熱温度が 500℃程度まで改善されている。このため、コンプレッサーディスク（使用上限温度約 500℃）に使用される。Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si 合金は、疲労特性とクリープ特性のバランスを得るために、等軸  $\alpha$  粒の面積率を 10 ~ 25% に調整した Bi-Modal 組織にする場合が多い<sup>4)</sup>。主な関連規格は、AMS 4919, 4975, 4976 である。本合金の焼鈍材は、常温で耐力が 860MPa 以上、引張強度が 930MPa 以上、伸びが 10%以上である<sup>3)</sup>。本合金は、Ti-6Al-4V 合金よりも  $\beta$  相が少ないために、時効処理は有効でなく、通常は溶体化処理（ $\beta$  変態点温度より 35℃以上低い温度）後に安定化焼鈍（590℃で 8 時間程度）を施して使用されている。

## (4) Ti-8Al-1Mo-1V 合金

Ti-8Al-1Mo-1V 合金は、1960 年頃に開発された合金であり、耐熱温度は 400℃程度である。Ti-6Al-4V 合金よりも耐熱温度が高いために、ファンブレードより耐熱性が要求されるコンプレッサーブレードなどに使用されている。主な関連規格は、AMS 4915, 4916, 4972, 4973 である。焼鈍材は、常温で耐力が 930MPa 以上、引張強度が 1000MPa 以上、伸びが 10%以上である<sup>3)</sup>。本合金は、Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si 合金と同様、 $\beta$  相が少ないために、溶体化処理後に安定化焼鈍を施して使用されている。

## (5) Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo (Ti-17) 合金

Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo 合金 (Ti-17 合金とも言われる)

は、高強度で破壊靱性に優れたチタン合金として 1970 年代に米国で開発された。耐熱温度は 350℃程度である。民間エンジンでファンとシャフトを一体化させ、エンジンの軽量化を図った。室温での耐力、引張強度は、それぞれ約 1150MPa、約 1250MPa であり、Ti-6Al-4V 合金に比べて 200MPa 程度高い。き裂伝播特性も優位であり、損傷許容設計に適した材料である。主な関連規格は、AMS 4955 である。STA（溶体化時効処理）材は、常温で耐力が 1055 ~ 1193MPa、引張強度が 1124 ~ 1265MPa、伸びが 5%以上である<sup>3)</sup>。

## (6) Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo 合金

Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo 合金は、1966 年頃に開発されたチタン合金であり、耐熱温度は 450℃程度である。高強度と優れたクリープ特性を兼ね備えている。主な関連規格は、AMS 4981 である。STA 材は、常温で耐力が 1105MPa 以上、引張強度が 1170MPa 以上、伸びが 10%以上である<sup>3)</sup>。

## (7) Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al 合金

Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al 合金は、1980 年頃に開発されたチタン合金である。溶体化処理材は、冷間加工性に優れ、純チタン JIS 4 種より高強度な薄板が得られる。機体には、この薄板を溶接して溶接管やダクトとして用いられている。主な関連規格は、AMS 4914 である。溶体化処理材で、耐力は 690 ~ 835MPa、強度は 745 ~ 945MPa、伸びが 12%以上、STA 材は、耐力が 965 ~ 1170MPa、引張強度が 1000MPa 以上、伸びが 7%以上である<sup>3)</sup>。

## (8) Ti-10V-2Fe-3Al 合金

Ti-10V-2Fe-3Al 合金は、焼き入れ性がよく、高強度、高疲労強度で高靱性の優れた合金である。主にランディングギア（離着陸装置用の主脚部品）に用いられている。主な関連規格は、AMS 4983, 4984, 4986, 4987 である。STA（溶体化時効処理）材は、常温で耐力が 1105MPa 以上、引張強度が 1240MPa 以上、伸びが 4%以上である<sup>3)</sup>。

## 3. 航空機へのチタン適用事例

### 3.1 航空機機体用チタン

世界 2 大民間航空機メーカーは、米国のボーイング社と欧州のエアバス社である。日本ではボーイング社の知名度が高いが、エアバス社も 2013 年 3 月には、日本で 100 機目の航空機を納入し、日本での存在感も増している。図 3 にエアバス社の最大型機 A380（標準レイアウトで 525 名搭乗の総 2 階建機）に参画した日本企業を示すが、新日鐵住金(株)を含め 21 社もの日本企業名が上げられており、エアバス社と我が国の航空産業界との強いつながりがある事も判る。新日鐵住金(株)とエアバス社の関係は、まだエアバス社がドイツ、フランス、英国、スペイン各社の企業連

## A380 Japanese Partners

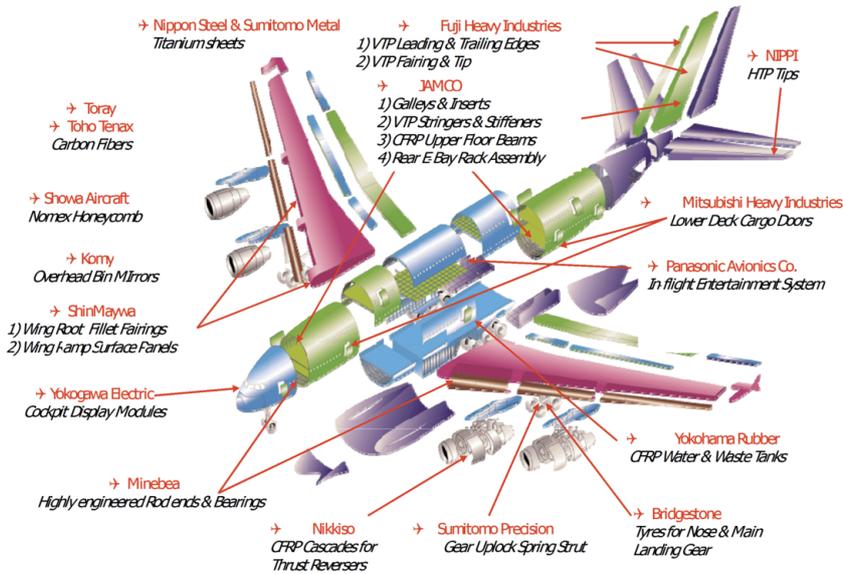


図3 A380 に参画した日本企業 (提供:エアバス)  
Japanese suppliers for A380 ((C)AIRBUS)

合であった1997年に遡る。

新日鐵住金(株)は当時の(独)ダイムラー・クライスラー・エアロスペース社に初めて純チタンシートを出荷した。その後エアバス社が2001年に統合企業となり、その翌2002年から現在に至るまで、継続して純チタンシートを納入し続けている。同社へ納入する純チタンシートについては、エアバス社の定める規格に基づき製造され、安定した品質と納期管理が最も重要である。この実現のため、航空宇宙品質マネジメントシステム(JIS Q 9100)や国際特殊工程認証システム(Nadcap: National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program)の取得が求められ、また必要に応じてエアバス社より個別の管理が求められる事もある。

チタンが航空機に使用される理由を表2に示す。飛行中の外気温は $-60^{\circ}\text{C}$ 以下にもなるが、チタンは低温でも脆化しにくい特性を有している。さらに、気温変化等で部品が結露しても腐食の懸念がないこと、および熱膨張しにくく、CFRPの熱膨張性と近いことなどから、航空機用途に適した材料といえる。純チタンは、表2の①から⑤の全ての特性を備えており、機体の様々な部品に用いられている。適用事例としては、エンジンの入り口部に当たる“ナセル”やエンジンを吊りさげる“パイロン”の部品、飛行中の凍

表2 航空機にチタンが使用される理由  
Purpose of titanium application on aerospace

① Weight saving
② Heat resistance
③ Resistance to embrittlement at low temperature
④ High corrosion resistance
⑤ Low-thermal expansion

結防止のための“温風配管(ブリナード・エアチューブ)”などがある。これらの部品は、機体の大きさやデザインによらず、必要な性能を確保することが必要であり、新日鐵住金(株)はこれまで品質の安定化に注力し、顧客より高い評価を受けてきている。

### 3.2 航空機エンジン用チタン

図4にエアバスA320等に使用されている、V2500エンジンのチタン合金適用例を示す。V2500エンジンは、日本の企業も参加した国際的合弁事業であるインターナショナル・エアロ・エンジンズが製造を行っており、新日鐵住金(株)も25年以上のチタン合金素材の納入実績を有している。製造している素材は、ファンケース(Fan case)、低圧圧縮機ブレード(Low-pressure compressor blade)、および静翼

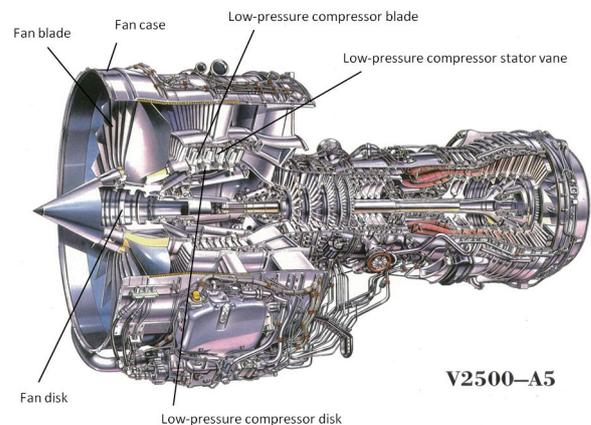


図4 航空機エンジン用チタン合金適用例  
(エンジンカット図提供:(一財)日本航空機エンジン協会)  
Example of the application of titanium alloy for aero engine  
(by courtesy of Japanese Aero Engines Corporation)

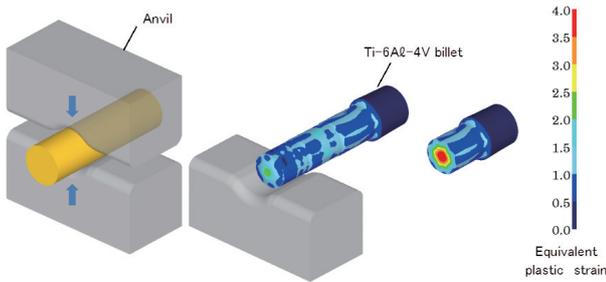


図5 FEM解析により求めたTi-6Al-4V合金ビレット鍛造時のひずみ分布  
Distribution of equivalent plastic strain during hot forging calculated by FEM analysis in Ti-6Al-4V billet

(Low-pressure compressor stator vane) 等用の鍛造素材棒が主体である。これらは、主にTi-6Al-4V合金およびTi-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si合金が使用されており、直径30mmの小径棒から300mmを超えるビレットまで、広範囲の寸法にわたり安定した品質が得られる製造技術を確認している。特に、航空機エンジン用素材は、インゴット製造工程で異物が混入すると、運航中の疲労破壊の起点になり得ることから<sup>9)</sup>、当該工程の汚染防止は徹底的に管理する必要がある。

新日鐵住金(株)では、清掃方法から設備管理方法に至るまで、徹底した汚染防止管理を実施しており、顧客からも高い信頼を得ている。また、超音波探傷検査等の非破壊検査および材料試験(日鉄住金テクノロジーズ(株)にて実施)においては、国際特殊工程認証システム(Nadcap)の認証、ならびにゼネラル・エレクトリック社、ロールスロイス社、および国内重工メーカーからの認証を得て、高い品質要求に対応している。

一方、チタンインゴット鍛造工程においては、品質確保と同時に最も効率的な操業となるよう、鍛造スケジュールを決定することが重要である<sup>9)</sup>。鍛造比率、鍛造圧下量、鍛造送り量および鍛造速度などの最適化検討ツールとして、FEM解析が適用されているが、実機材の高温圧縮試験による変形抵抗モデルの適用により、より迅速かつ正確な解析技術を確認している。鍛造解析例を図5に示す。鍛造ビレットの表面ひずみおよび中心部ひずみが最適になるような鍛造スケジュールを検討し、品質の安定化およびコスト削減をはかっている。

#### 4. 航空機用チタン適用拡大のための課題と取り組み

一般に、チタン適用拡大に際しては、価格、製造リードタイムおよび品質における競争力の向上が重要であるが、特に航空機用途の拡大に際しては、各種認証の取得および品質の維持改善が必要となる。ここでは、各種の認証取得および品質モニタリング管理による維持改善の取り組みについて述べる。

#### 4.1 認証取得および維持

航空機用チタン材には“安定した品質と納入”が常に求められる、この実現のため航空宇宙品質マネジメントシステム(JIS Q 9100)や国際的な特殊工程認証制度(Nadcap)の取得が必要である。

航空宇宙品質マネジメントシステム(JIS Q 9100)は、世界の主要な航空宇宙関係企業が1998年に設立したIAQG(International Aerospace Quality Group)により品質の改善とコスト削減を目的として開発された航空宇宙産業向けの国際品質マネジメントシステム規格(IAQG 9100規格)と同等の規格である。この規格はアメリカではAS 9100、ヨーロッパではEN 9100として規格化されているが、JIS Q 9100はこれらと相互に同等であると認識されているため、日本企業はJIS Q 9100の認証を取得すれば、IAQG-OASISデータベース(Online Aerospace Supplier Information System)に登録され、アメリカ、ヨーロッパ等の顧客に対しても認証企業として通用する<sup>7)</sup>。

JIS Q 9100は、現在普及している品質マネジメントシステム(JIS Q 9001)をベースに、例えば“製品品質とオンタイムデリバリーのパフォーマンス測定・改善”や“初回製品検査(FAI: First Article Inspection)を製造プロセスの検証とする要求事項”など、航空宇宙産業独自の要求事項が追加されたものである。品質マネジメントシステム規格であるため、これから航空宇宙分野へ参入しようとする企業は、まず本規格の認証を取得する必要がある。認証を取得すると定期審査が毎年、更新審査が3年おきに行われる。

一方、国際的な特殊工程認証制度(Nadcap)は、アメリカのNPOである、PRI(Performance Review Institute)が審査機関として運営している認証制度である。PRIにはエアバス社、ボーイング社、ロールスロイス社、ゼネラル・エレクトリック社等、世界の機体、エンジンおよび搭載機器のプライム各社が参加している。IAQG 9100が世界に展開、規格化され、公的機関による第三者認証の仕組みであるのに対し、Nadcapは航空宇宙プライム各社が参加して審査機関(PRI)を組織し、これを有効活用する事でプライム各社の要求事項の統一を図っている。その結果、プライム各社が個別に実施していた審査の削減、あるいは同一規格製品を複数のプライムに供給しているサプライヤーの類似審査受審の削減も目指した、業界運営のシステムとなっている。

PRIは現在アメリカ、ヨーロッパ、日本、中国等、世界展開をしており、Nadcap認証申請はWEBを通じてアメリカのPRI本部に行くものの、審査には各地域に応じた審査官がアメリカ以外からも派遣される。なお審査官はいずれも審査分野の業務に精通したエキスパートであり、審査官の在籍国によらず極めてレベルの高い審査が実施される<sup>8)</sup>。Nadcap認証取得に際しては、種々のハードルがある。まず提出必要書類や該当する社内作業手順書類はすべて英語

で用意する必要があり、特に初回は膨大な量の英訳が必要となる。

また審査は作業自体を直接審査官が複数現認するため、複数日におよぶ審査となる事が通常であり、なおかつ審査は全て英語で行われるために、その対応準備も必要となる。また、指摘事項については、審査官に回答するのではなく、アメリカのPRI本部にいる別の審査官への回答になるため、指摘を受けた状況等の背景の説明も必要となる。従って、書面上の記載内容が重要であり、英文での正確な回答が求められる。なお新日鐵住金(株)は、Nadcap-HT(熱処理)を直江津製造所と新日鐵住金ステンレス(株)光製造所内にある設備で、NDT(非破壊試験)を製鋼所で、材料試験を日鉄住金テクノロジーズ(株)で取得している。

#### 4.2 品質モニタリング管理

航空宇宙品質マネジメントシステム(JIS Q 9100)において、“測定、分析および改善”が規定されている。製品要求事項および品質マネジメントシステムの適合を実証するために、“統計的手法を含め、適用可能な方法、およびその使用の程度を決定することが含まなければならない”とされており、航空機用分野においては、これらの要求事項を満足させるとともに、有効に活用することが課題である。新日鐵住金(株)では、キー特性<sup>9)</sup>を選定の上、統計的管理による工程能力の測定を実施している。キー特性としては、化学成分、機械的性質、および各工程における重要管理項目などがあり、日常的に統計管理を行い品質の監視を行っている。トレンド管理に際しては、工程能力の監視以外にも品質の推移を把握して、予防的な改善活動を展開している。

新日鐵住金(株)では、品質モニタリング管理の一環として、これらの統計的な管理活動を積極的に展開している。また、最近の取り組みとして、独自に品質モニタリングシステムを構築してきた。材料試験データ、鍛造データ、および歩留り等の生産実績データをデータベース化し、品質トレンドの見える化および各因子の相関調査が容易となるように設計し、品質改善およびコスト削減活動に活用している。当システムの構築に際しては、鍛造データ等をリアルタイムで取り込むことができる鍛造ロギングシステムも導入しており、オペレータへのフィードバックおよび教育にも活用している。

#### 5. まとめ

航空機機体およびエンジン用チタンは、航空機の低燃費化に伴い、ますます需要が拡大している。航空機用チタンは、用途に応じて様々な材質が適用されており、成形加工性を重視する機体用としては純チタンが、耐熱性および強度を重視するエンジン用としてはチタン合金が使用されている。

新日鐵住金(株)は、(仏)エアバス社、(英)ロールスロイス社、および国内重工メーカーから認証を取得し、機体用およびエンジン用チタンを長年にわたり量産してきた。航空機用品質マネジメントシステム(JIS Q 9100)、および国際特殊工程認証システム(Nadcap)の認証取得に際しては、様々な品質改善をはかり、顧客からの信頼を築いてきた。

今後、航空機用チタン適用拡大のため、さらなる認証取得の拡大および品質管理のレベルアップに取り組み、併せて航空機産業への貢献をはかって行きたい。

#### 参考文献

- 1) Audion, S. et al.: Ti-2011 Proc. of the 12th World Conf. on Ti. Ed. Zhou, L. et al., Beijing, Science Press Beijing, 2012, p. 1935
- 2) Titanium 2012, 28th ITA Annual Conference Proceedings. 2012, CD-ROM
- 3) 日本チタン協会編：チタンパンフレット. 2007.4
- 4) 錦織貞郎：軽金属. 55 (11), 557 (2005)
- 5) Williams, J.C.: Titanium. 2nd Edition. Germany, Springer, 2007, p. 68
- 6) 日本塑性加工学会：チタンの基礎と加工. 初版. 東京, コロナ社, 2008, p. 107
- 7) 日本航空宇宙工業会編：航空と宇宙. 664, 16 (2009)
- 8) 小山隆一：JAQG平成19年度活動報告会. 東京および名古屋, 2007
- 9) 宇佐美寛 ほか：航空・宇宙・防衛品質マネジメントシステムの解説. 第2版. 愛知, (株)ティ・エフ・マネジメント, 2011, p. 26



稲垣育宏 Ikuhiro INAGAKI  
交通産機品事業部 製鋼所 産機品製造部長  
大阪府大阪市此花区島屋5-1-109 〒554-8555



武智 勉 Tsutomu TAKECHI  
チタン・特殊ステンレス事業部 チタン技術部  
チタン商品技術室長



白井善久 Yoshihisa SHIRAI  
鉄鋼研究所 チタン・特殊ステンレス研究部  
主幹研究員



有安 望 Nozomu ARIYASU  
チタン・特殊ステンレス事業部 チタン技術部  
チタン技術・管理室 主幹